

IB 131-2006/35

**IMPACT- UND RESTFESTIGKEITS-
VERSUCHE AN SANDWICHPLATTEN
MIT FALTWABENKERNEN**

Anja Wetzel, Luise Kärger

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Braunschweig



DEUTSCHES ZENTRUM
FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT e.V. (DLR)
INSTITUT FÜR FASERVERBUNDLEICHTBAU UND ADAPTRONIK

IB 131-2006/35

**IMPACT- UND RESTFESTIGKEITSVERSUCHE
AN SANDWICHPLATTEN
MIT FALTWABENKERNEN**

Braunschweig, 15. September 2006

Der Bericht umfasst:
33 Seiten,
6 Tabellen und
33 Abbildungen

Institutsleiter:

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. E. Breitbach

Dipl.-Ing. A. Wetzel

Zielfeldleiter:

Dipl.-Ing. L. Kärger

Dr.-Ing. Jan Teßmer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Impactversuche	3
2.1	Versuchsprogramm	3
2.2	V Versuchsergebnisse	5
3	Restfestigkeitsversuche	9
3.1	Untersuchte Proben	10
3.2	Auswertung	12
3.2.1	Restfestigkeiten	13
3.2.2	Steifigkeiten	15
3.2.3	ARAMIS-Ergebnisse	16
4	Zusammenfassung	23
	Literaturverzeichnis	25
A	Materialbeschreibung für die Deckschichten	26
B	Schadensbilder der durch Impact belasteten Sandwichschalen	28

Abbildungsverzeichnis

1.1	Abmessungen einer Sandwichprobe.	1
1.2	Untersuchte Strukturen	2
2.1	Pendelschlagwerk des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik.	3
2.2	Durch Impactor belastete Sandwichprobe.	4
2.3	Kontaktkraft-Zeit-Verläufe der Vorversuche.	5
2.4	Infolge eines Impacts gerissene Deckschichten.	6
2.5	Kontaktkraft-Zeit-Verläufe der Impactversuche mit Erfassung der Streuung.	7
3.1	Schraubverbindung und Druckvorrichtung am ILR Dresden	9
3.2	Anordnung der DMS auf der Vorder- und der Rückseite	10
3.3	Ultraschallbilder unmittelbar nach der Herstellung der Proben	13
3.4	Restfestigkeiten für unterschiedlich vorgeschädigte Proben	13
3.5	Dehnungen über Kraft für künstlich vorgeschädigte Proben	15
3.6	Dehnungen über Kraft für künstlich vorgeschädigte Proben im Vergleich zur ungeschädigten Probe	16
3.7	Dehnungen über Kraft für impactierte Proben	17
3.8	Transversale Verschiebung in Plattenmitte	17
3.9	Dehnungen über Kraft für impactierte Proben im Vergleich zur ungeschädigten Probe	18
3.10	Kraft über der Zeit für Proben mit 10J-Impact	18
3.11	Wachsen der transversalen Verschiebungen für Probe 10J_04	19

3.12 In-plane Verformungen in Lastrichtung unmittelbar vor erstem kleinen Lastabfall für Probe 10J_04	19
3.13 Wachsen der transversalen Verschiebungen der dünnen Deckschicht für Probe OH20_02	20
3.14 Wachsen der transversalen Verschiebungen der dicken Deckschicht für Probe OH20_02	20
3.15 In-plane Verformungen in Lastrichtung unmittelbar vor erstem kleinen Lastabfall für Probe OH20_02	21
3.16 Wachsen der transversalen Verschiebungen der dünnen Deckschicht (obere Reihe) und der dicken Deckschicht (untere Reihe) für Probe DT_02	21
B.1 Fotos der impactbelasteten Deckschichten bei 5J- und 8J-Impacts.	29
B.2 Fotos der impactbelasteten Deckschichten bei 10J- und 12J-Impacts.	29
B.3 Fotos der impactbelasteten Deckschichten bei 15J- und 20J-Impacts.	30
B.4 30J-Impact: Foto und Ultraschallbilder der impactbelasteten Deckschicht. .	30
B.5 Fehlerechos der impactbelasteten Deckschichten bei 5J- und 8J-Impacts. .	31
B.6 Fehlerechos der impactbelasteten Deckschichten bei 10J- und 12J-Impacts. .	31
B.7 Fehlerechos der impactbelasteten Deckschichten bei 15J- und 20J-Impacts. .	32
B.8 Rückwandechos der impactbelasteten Deckschichten bei 5J- und 8J-Impacts. .	32
B.9 Rückwandechos der impactbelasteten Deckschichten bei 10J- und 12J-Impacts. .	33
B.10 Rückwandechos der impactbelasteten Deckschichten bei 15J- und 20J-Impacts. .	33

Tabellenverzeichnis

2.1	Impact-Versuchsprogramm.	4
2.2	Mittlere Eindelltiefen der Impactversuche.	8
3.1	Probenbezeichnung für Restfestigkeitsversuche	11
3.2	Restfestigkeiten, sichtbare Schädigungen und transversale Verformungen . .	14
A.1	Lagenaufbau der Deckschichten	26
A.2	CFK-Material	27

Kapitel 1

Einleitung

Im vorgestellten Versuchsprogramm wurden für Sandwichplatten mit Faltwabenkernen aus Kasan (Russland) und Deckschichten aus Kohlefaserkunststoff (CFK) Impactversuche und Restfestigkeitsversuche durchgeführt. Die Impactversuche erfolgten mit Energien zwischen 5J und 30J; sie werden in Kapitel 2 vorgestellt. Für die impactgeschädigten Sandwichplatten sowie für weitere Sandwichplatten mit künstlichen Schäden (Eindellungen, Faserrisse, Löcher) erfolgten anschließend Restfestigkeitsversuche in Form von einaxialen in-plane Druckversuchen (auch CAI(Compression After Impact)-Versuche genannt), die in Kapitel 4 beschrieben werden. Für einen kraftschlüssigen Lasteintrag bei den Restfestigkeitsversuchen wurden die Deckschichten mit je 50cm Überstand gefertigt, vgl. Abbildung 1.1.

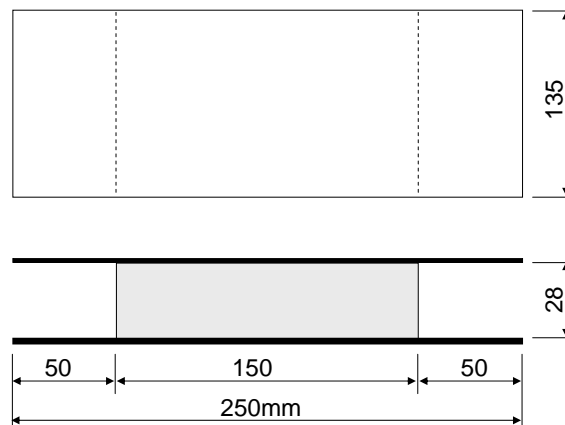
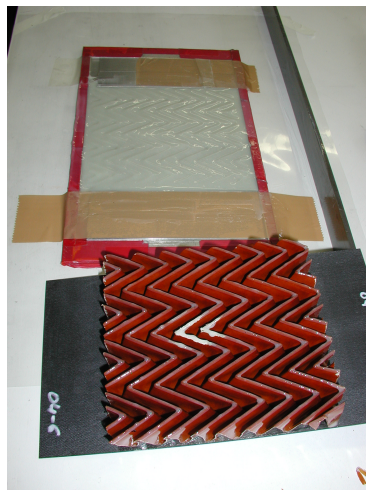
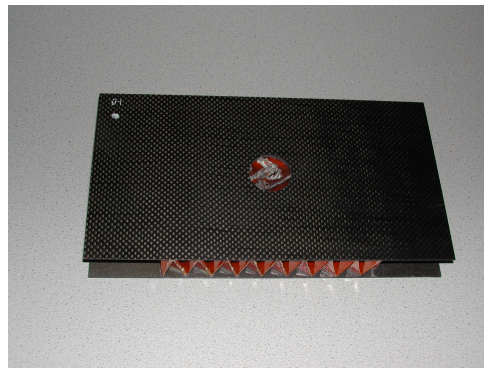


Abbildung 1.1: Abmessungen einer Sandwichprobe.

In Abbildung 1.2(a) ist die Struktur der Faltwaben während der Herstellung einer Sandwichplatte, kurz vor der Verklebung mit der Deckschicht, dargestellt. Die Faltwaben wurden mittels eines Kaltklebers (Epibond) mit den Deckschichten verbunden. Beide Deckschichten sind aus Prepregmaterialien hergestellt. Die dünnere Deckschicht, die gleichzeitig die impactbelastete bzw. geschädigte Deckschicht ist, ist ein Laminat aus Gewebe und Tape. Die dickere Deckschicht ist ein Laminat aus unidirektionalen Einzelschichten.



(a) Falzwaben



(b) Sandwichstruktur mit Loch

Abbildung 1.2: Untersuchte Strukturen

Lagenaufbauten und Materialien der Deckschichten sind im Anhang A angegeben. Eine Materialbeschreibung für den Falzwabenkern ist der Studienarbeit von Markus Kintscher [1] zu entnehmen. Abbildung 1.2(b) zeigt eine fertige Sandwichstruktur mit einem Loch in der Deckschicht, die für die Restfestigkeitsversuche verwendet wurde.

Kapitel 2

Impactversuche

2.1 Versuchsprogramm

Die Impactversuche wurden am DLR, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik mit einem Pendelschlagwerk durchgeführt, siehe Abbildung 2.1. Der Impactor ist eine Halbkugel aus Stahl mit einem Durchmesser von 25,4mm. Die effektive Masse des Pendelarms samt Impactor beträgt 5,285kg. Für nähere Erläuterungen zum Pendelschlagwerk und zur Ermittlung der effektiven Masse sei auf die Arbeit von Rolf van Huffelen [2] verwiesen.



Abbildung 2.1: Pendelschlagwerk des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik.

Die Sandwichproben wurden vollflächig aufgelagert und gegen Hochspringen gesichert, siehe Abbildung 2.2. Es wurden zunächst sieben Proben mit verschiedenen Impactenergien zwischen 5J und 30J belastet, um einen ersten Eindruck vom Impactverhalten zu gewinnen. Anhand der Ergebnisse aus den Vorversuchen wurden drei charakteristische Energien ausgewählt (8J, 10J, 15J), für die jeweils vier weitere Versuche durchgeführt wurde, so dass insgesamt 19 Proben getestet wurden. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 2.1 angegeben.

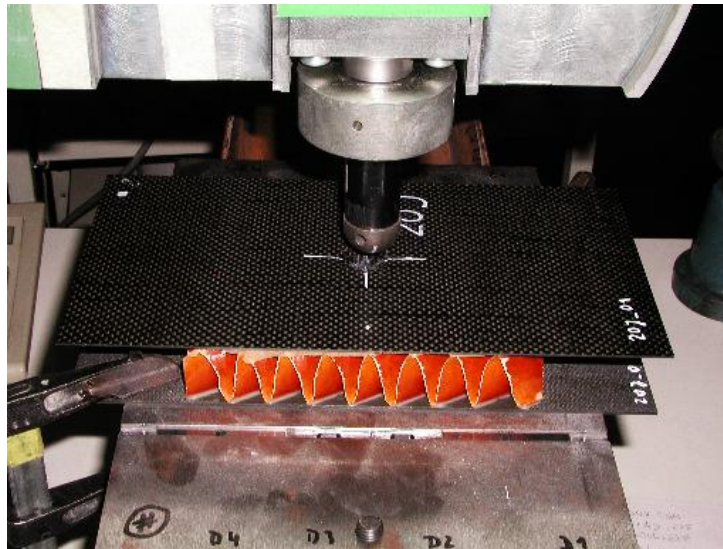


Abbildung 2.2: Durch Impactor belastete Sandwichprobe.

Versuch	Energie / J	Proben-Nr.	Reihenfolge	Datum
5J_01	5	1-1	1	06.07.2005
8J_01	8	1-3	7	06.07.2005
10J_01	10	1-9	6	06.07.2005
12J_01	12	2-14	5	06.07.2005
15J_01	15	2-18	2	06.07.2005
20J_01	20	2-4	4	06.07.2005
30J_01	30	2-3	3	06.07.2005
8J_02	8	1-2	8	07.07.2005
8J_03	8	1-17	9	07.07.2005
8J_04	8	1-8	10	07.07.2005
8J_05	8	1-15	11	07.07.2005
10J_02	10	1-19	12	07.07.2005
10J_03	10	1-18	13	07.07.2005
10J_04	10	1-11	14	07.07.2005
10J_05	10	1-16	15	07.07.2005
15J_02	15	1-20	16	07.07.2005
15J_03	15	2-5	17	07.07.2005
15J_04	15	2-19	18	07.07.2005
15J_05	15	2-9	19	07.07.2005

Tabelle 2.1: Impact-Versuchsprogramm.

2.2 Versuchsergebnisse

Vorversuche

Aus den sieben Vorversuchen ergaben sich die in Abbildung 2.3 dargestellten Kontaktkraft-Zeit-Verläufe. Eine Zusammenstellung der Schadensbilder ist in Anhang B zu finden. Bei den Kraftverläufen lassen sich zwei Typen ausmachen: Die beiden grünen Kurven (5J, 8J) verlaufen über ihr Maximum hinweg sinusförmig, während alle anderen Kurven deutlich einbrechen, sobald etwas mehr als 2,5kN erreicht sind. Dieser Abfall der Kontaktkraft ist mit einer massiven Schädigung der Sandwichstruktur verbunden, welche mit Hilfe der Schadensbilder als Aufreißen der Deckschicht ausgemacht werden konnte: Bei 5J und 8J sind keine Schäden sichtbar, ab 10J weist die Deckschicht sichtbar Risse auf, wie in den Abbildungen 2.4 zu sehen. Je höher die Energie, um so länger werden die Risse und um so tiefer wird die bleibende Eindellung. Bei 30J wird die obere Deckschicht komplett durchgeschlagen.

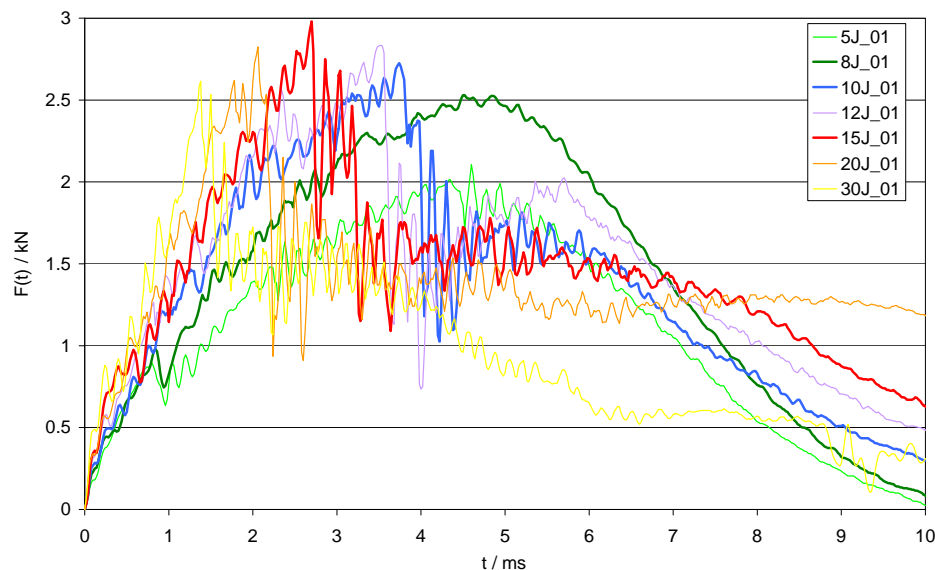


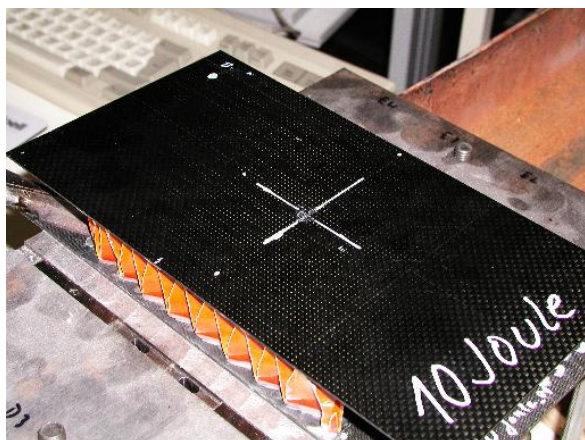
Abbildung 2.3: Kontaktkraft-Zeit-Verläufe der Vorversuche.

Untersuchung der Streuungen

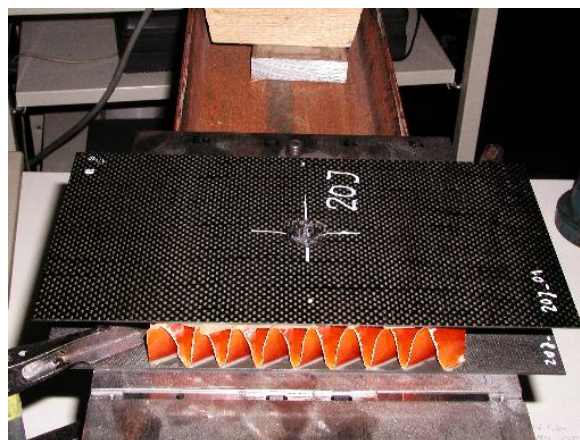
Für eine Erfassung der Streubreite der Versuche wurden drei Impactenergien ausgewählt, mit denen jeweils vier weitere Versuche durchgeführt wurden:

- 8J für Impacts, bei denen die Deckschicht gerade noch intakt bleibt,
- 10J für Impacts, bei denen die Deckschicht gerade reißt,
- 15J für Impacts, bei denen die Deckschicht stark geschädigt und eingedellt ist.

Die zugehörigen Kontaktkraft-Zeit-Verläufe sind in den Abbildungen 2.5 dargestellt. Trotz der recht schlechten Qualität der Falzwabenkerne (vgl. [1]) und der damit einhergehenden



(a) 10J-Impact



(b) 20J-Impact

Abbildung 2.4: Infolge eines Impacts gerissene Deckschichten.

schlechten Anbindung der Kerne an die Deckschichten (siehe Rückwandeckos in den Abbildungen B.8 - B.10), ist die Streuung der Impactversuchs-Ergebnisse verhältnismäßig gering. Nur beim 10J-Impact gibt es scheinbar eine Abweichung: Bei einem Versuch (10J_05) fällt die Kontaktkraft nicht sprunghaft ab und die Deckschicht ist hinterher nicht gerissen. Dieser Versuch macht deutlich, dass 10J die Grenzenenergie ist, bei der die kritische Kontaktkraft gradeso erreicht wird, so dass die Deckschicht reißen kann. Bei 8J ist dies nie der Fall; bei 15J reißt sie immer.

Anhand der Rückwandeckos in den Abbildungen B.8 - B.10 lässt sich bei den 5J- und 8J-Impacts ganz gut nachvollziehen, ob der Impactor genau auf eine Falz der Faltwabe oder auf den Faltwabenzwischenraum getroffen hatte. Bei den Proben 8J_02 und 8J_04 war es eine Falz, bei den anderen war es der Faltwabenzwischenraum. In den Kontaktkraft-Zeit-Kurven in Abbildung 2.5(a) weisen die Proben 8J_02 und 8J_04 zu Beginn die größten Steifigkeiten auf und die größte Kontaktkraft im Moment des ersten Kernversagens, wenn die Kraft zum ersten Mal abfällt. Dieser Unterschied ist jedoch verhältnismäßig gering und verliert sich im weiteren Impactverlauf vollständig.

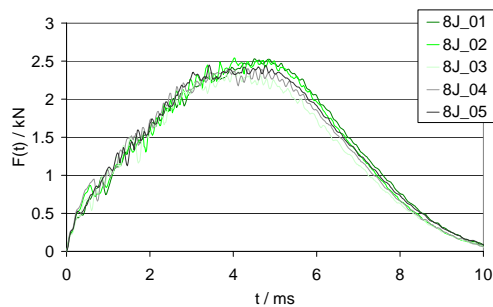
Bleibende Eindellungen

Im Anschluss an die Impactversuche wurden die Eindelltiefen je dreimal aus vier verschiedenen Richtungen gemessen und daraus ein Mittelwert gebildet. Die mittleren Eindelltiefen sind in Tabelle 2.2 angegeben. Von allen 10J-Proben zeigt Probe 10J_05, bei der die Deckschicht nicht gerissen war, mit Abstand die kleinste Eindellung. Dass bei den 15J-Proben die Streuung so groß ist, liegt an der Art des Schadens: Durch die Risse bilden sich quasi vier einzelne Lappen, die sich unterschiedlich stark durchbiegen und sich auch schwierig vermessen lassen.

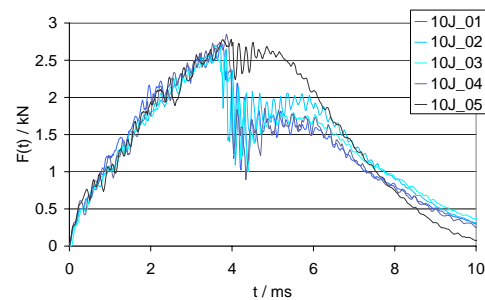
Schadensdetektion mit Ultraschall

Mit Hilfe von Ultraschall wurden weitere Informationen über Art und Größe des Schadens gewonnen, siehe Anhang B. Wie erwartet, nimmt die Größe des Schadens mit steigender

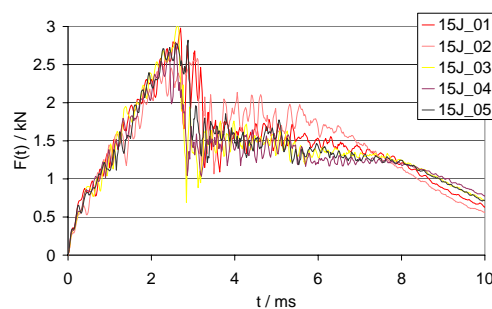
Impactenergie zu. Bisher können durch Fehler- und Rückwandechos der Deckschicht jedoch leider nur Delaminationen detektiert und die Anbindung der Deckschicht an den Kern überprüft werden. Über einzelne Faser- oder Matrixbrüche lässt sich keine Aussage treffen; erst komplette Risse durch die Deckschicht sind sichtbar. Außerdem lassen sich Faltrwaben bisher nicht mit Ultraschall untersuchen, da die Schallwellen an den Wabenwänden schräg reflektiert werden und nicht wieder aufgefangen werden können. Somit ist auch die Größe des Kernschadens nicht bekannt. Bei einer Probe wurde durch vorsichtiges Fräsen die Deckschicht entfernt. Dabei wurde festgestellt, dass der Bereich mit Knicken in der Wabenstruktur sehr viel größer ist als der Deckschichtschaden.



(a) 8J-Impacts



(b) 10J-Impacts



(c) 15J-Impacts

Abbildung 2.5: Kontaktkraft-Zeit-Verläufe der Impactversuche mit Erfassung der Streuung.

Probe	Impact	mittlere Eindelltiefe [μm]
5J_01	5 Joule	39
8J_01	8 Joule	47
8J_02	8 Joule	55
8J_03	8 Joule	30
8J_04	8 Joule	67
8J_05	8 Joule	29
10J_01	10 Joule	282
10J_02	10 Joule	347
10J_03	10 Joule	230
10J_04	10 Joule	453
10J_05	10 Joule	72
12J_01	12 Joule	519
15J_01	15 Joule	1526
15J_02	15 Joule	911
15J_03	15 Joule	1708
15J_04	15 Joule	3517
15J_05	15 Joule	3995
20J_01	20 Joule	6403
30J_01	30 Joule	Durchschlag

Tabelle 2.2: Mittlere Eindelltiefen der Impactversuche.

Kapitel 3

Restfestigkeitsversuche

Mit den einaxialen in-plane Druckversuchen wurde das Institut für Luft- und Raumfahrtstechnik (ILR) der TU Dresden beauftragt. In den Lasteinleitungsbereichen wurde der Kern durch Aluminiumblöcke ersetzt. Um die planparallelen Aluminiumblöcke und weitere Aluminiumklötze auf der Außenseite der Deckschichten schubsteif mit den Deckschichten zu verbinden, wurde eine aufwendige Schraubverbindung, wie in den Abbildungen 3.1 zu sehen, verwendet. In die Druckversuchsvorrichtung eingebaut wurden die Proben mit seitlichen Knickstützen versehen.

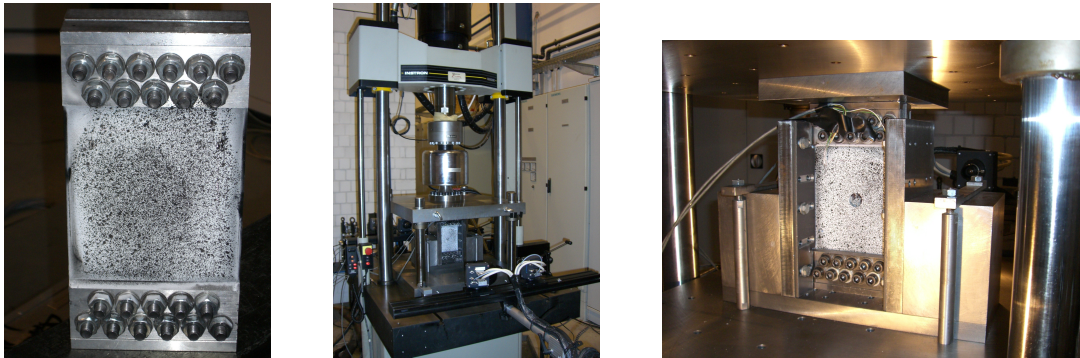


Abbildung 3.1: Schraubverbindung und Druckvorrichtung am ILR Dresden

Während in der Datei *Beobachtungen_ILRDresden.txt* die Beobachtungen zum Versagensverlauf zusammengefasst sind, sind im Ordner *Versuchsdaten* für jeden Versuch die zeitlichen Verläufe

- der Prüfmaschinenkraft,
- des Prüfmaschinenweges,
- der axialen Dehnungen der vier Dehnmessstreifen DMS 1 bis DMS 4,
- der Temperaturdehnungen auf der Vorder- (VS) und Rückseite (RS) der beiden Kompensations-DMS sowie
- der transversalen Verschiebung in der Mitte der hinteren dickeren Deckschicht

in elektronischer Form zu finden.

Die Versuchsdaten für den Prüfmaschinenweg sind nicht für die Versuchsauswertung zu gebrauchen, da der Prüfmaschinenweg nicht nur die Verformung der Probe, sondern auch die Verformungen der Prüfmaschine beinhaltet. Jedoch sind für alle durchgeführten Versuche die Kraft-Stauchungs-Kurven vorhanden. Die Anordnung der DMS ist Abbildung 3.2 zu entnehmen. Die Kompensations-DMS sind nicht auf der Probe aufgebracht. Sie zeichnen

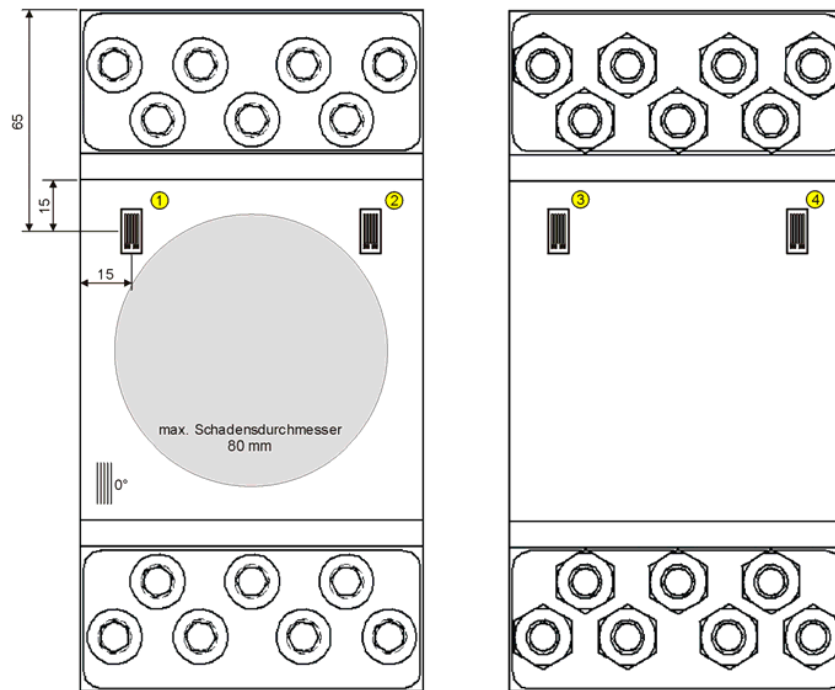


Abbildung 3.2: Anordnung der DMS auf der Vorder- und der Rückseite

die Dehnungen infolge von Temperaturschwankungen auf. Die transversalen Verschiebungen in der Mitte der hinteren dickeren Deckschicht sind positiv, wenn sich die hintere dickere Deckschicht vom Kern weg verschiebt.

Für einige Versuche gibt es zusätzlich *Videoaufzeichnungen* der Vorderseite (dünnere Deckschicht) und für vier ausgewählte Proben wurden ARAMIS-Messungen, d.h. optische Verschiebungsmessungen, während des Druckversuches vorgenommen. Mit den ARAMIS-Messungen erhält man flächige Aussagen über das 3D-Verschiebungsfeld auf der Vorder- und Rückseite des Sandwichs während des gesamten Versuches.

Im Abschnitt 3.1 sind die untersuchten Proben zusammengestellt, während die Auswertung der Versuche im Abschnitt 3.2 folgt.

3.1 Untersuchte Proben

In Tabelle 3.1 sind die 40 untersuchten Proben nach jeweiligem Schadenstyp aufgelistet. Es wurden vier ungeschädigte Proben, jeweils eine bzw. drei Proben mit Impactschäden

Art der Schädigung	Benennung DLR	Benennung ILR
ohne (UD)	ung_01_1(3)-4	05LFT_DLR_UD_04
	ung_02_1(3)-10	05LFT_DLR_UD_01
	ung_03_1(3)-13	05LFT_DLR_UD_03
	ung_04_1(3)-14	05LFT_DLR_UD_02
Eindellung (DT)	del_01_2(4)-1	05LFT_DLR_DT_03
	del_02_2(4)-6	05LFT_DLR_DT_02 (ARAMIS)
	del_03_2(4)-11	05LFT_DLR_DT_03-4-11-2-11
	del_04_2(4)-16	05LFT_DLR_DT_01
Faserriss (NT)	fas_01_2(4)-2	05LFT_DLR_NT_03
	fas_02_2(4)-7	05LFT_DLR_NT_01
	fas_03_2(4)-12	05LFT_DLR_NT_02
	fas_04_2(4)-17	05LFT_DLR_NT_04
Loch $\emptyset 20$ (OH20)	d20_01_1(3)-7	05LFT_DLR_OH20_03
	d20_02_1(3)-12	05LFT_DLR_OH20_04
	d20_03_2(4)-10	05LFT_DLR_OH20_01
	d20_04_2(4)-15	05LFT_DLR_OH20_02 (ARAMIS)
Loch $\emptyset 30$ (OH30)	d30_01_1(3)-5	05LFT_DLR_OH30_03
	d30_02_1(3)-6	05LFT_DLR_OH30_02
	d30_03_2(4)-13	05LFT_DLR_OH30_01
	d30_04_2(4)-20	05LFT_DLR_OH30_04
Impact 5J	5J_01_1(3)-1	05LFT_DLR_5J_01 (ARAMIS)
Impact 8J	8J_01_1(3)-3	05LFT_DLR_8J_01
	8J_02_1(3)-2	kein CAI-Versuch
	8J_03_1(3)-17	05LFT_DLR_8J_03
	8J_04_1(3)-8	05LFT_DLR_8J_04
	8J_05_1(3)-15	kein CAI-Versuch
Impact 10J	10J_01_1(3)-9	05LFT_DLR_10J_01 (1.Versuch; globales Versagen)
	10J_02_1(3)-19	kein CAI-Versuch
	10J_03_1(3)-18	05LFT_DLR_10J_03
	10J_04_1(3)-11	05LFT_DLR_10J_04 (ARAMIS)
	10J_05_1(3)-16	kein CAI-Versuch
Impact 12J	12J_01_2(4)-14	05LFT_DLR_12J_01
Impact 15J	15J_01_2(4)-18	05LFT_DLR_15J_01
	15J_02_1(3)-20	05LFT_DLR_15J_02
	15J_03_2(4)-5	kein CAI-Versuch
	15J_04_2(4)-19	05LFT_DLR_15J_04
	15J_05_2(4)-09	kein CAI-Versuch
	15J_06_2(4)-8 (Impact am ILR)	kein CAI-Versuch (schiefgegangen)
Impact 20J	20J_01_2(4)-4	05LFT_DLR_20J_01
Impact 30J	30J_01_2(4)-3	05LFT_DLR_30J_01

Tabelle 3.1: Probenbezeichnung für Restfestigkeitsversuche

der zugehörigen Energien 5J, 8J, 10J, 12J, 15J, 20J und 30J und jeweils vier Proben mit künstlichen Schädigungen in Form

- einer Eindellung mit einem Durchmesser von 20 mm,
- eines Faserrisses von 20 mm Länge durch die gesamte dünnere Deckschicht,
- eines Loches in der dünneren Deckschicht mit einem Durchmesser von 20 mm,
- eines Loches in der dünneren Deckschicht mit einem Durchmesser von 30 mm,

einaxial gedrückt und deren Festigkeit bzw. Restfestigkeit bestimmt. Für die Bestimmung der Schadensgröße liegen Ultraschallbilder der geimpacteten Proben in elektronischer Form vor.

Nicht alle der 40 Proben wurden auf Druck untersucht. Sechs der Proben sollen aufgeschnitten werden, um das Schadensbild und die Schadensgröße im Faltwabenkern infolge verschiedener Impactenergien zu bestimmen. Dies ist notwendig, da eine zerstörungsfreie Prüfung, z.B. mittels Ultraschall, derzeit noch nicht möglich ist.

3.2 Auswertung

In den früheren Versuchen an Sandwichstrukturen im Rahmen des Projektes LuFo3 ergab sich das folgende Versagensmuster: Die Eindellung infolge des Impactschadens wuchs mit zunehmender Belastung quer zur Belastungsrichtung fast bis zum Rand der Probe, bevor die Probe durch Ausbeulen über die gesamte Probenbreite versagte. Dieses langsame Ausbreiten der Eindellung ist bei dem hier vorgestellten Versuchsprogramm nur selten mit bloßem Auge zu beobachten, so zum Beispiel bei einer der 10J-Proben. Ebenso ist eine einseitige Beule bei einer der OH30-Proben im Video zu sehen. Mit den ARAMIS-Messungen konnte jedoch ein ähnliches Wachsen der Eindellung mit sehr kleinen transversalen Verformungen sichtbar gemacht werden. Das Versagen der Probe trat schlagartig ein und ging mit einem lauten Knall einher. Kurz vor dem plötzlichen Versagen war ein leises Knistern zu hören, was darauf hindeutet, dass Teile der Faltwabenbeschichtung in diesem Moment abplatzten. Die Papier-Faltwaben aus Kasan wurden noch in Harz getaucht. Das Nomex-Papier wurde dabei nicht richtig durchtränkt, sondern lediglich mit einer spröden Harzbeschichtung überzogen.

In einigen Fällen hat sich der Kern von der dünneren Deckschicht abgelöst. Dieses Ablösen des Kerns von den Deckschichten ist nicht erwünscht. Es wird angestrebt, dass das Material an sich und nicht die Verbindungen versagen. Die Faltwaben variierten sehr stark in ihrer Höhe, so dass eine flächige Anbindung nur in wenigen Fällen möglich war, was die Ultraschallbilder, die unmittelbar nach der Herstellung aufgenommen wurden, belegen (siehe beispielhaft Abbildung 3.3). Mit den von den Kollegen der Universität Stuttgart mittlerweile hergestellten Faltwaben sind sicherlich bessere Anbindungen mit Epibond möglich. Es ist zu untersuchen, ob die Anbindung der Faltwaben an die Deckschichten mit Epibond die optimale Lösung ist.

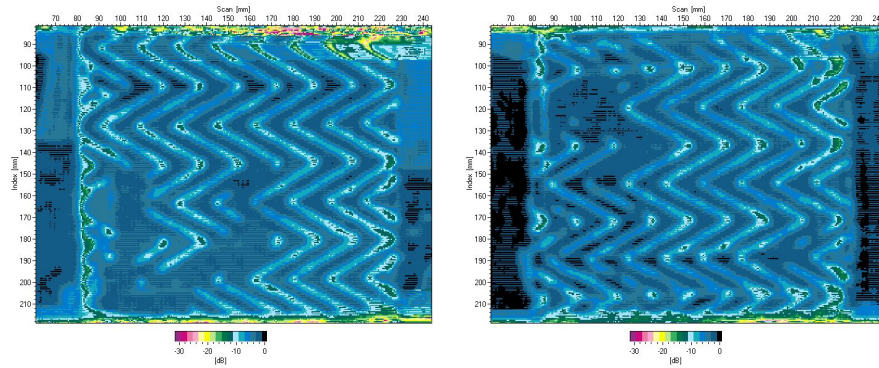


Abbildung 3.3: Ultraschallbilder unmittelbar nach der Herstellung der Proben

3.2.1 Restfestigkeiten

Unter Restfestigkeit soll hier die Last verstanden werden, bei der eine vorgeschädigte Probe versagt. In Abbildung 3.4 sind die den Restfestigkeiten entsprechenden Druckkräfte für die unterschiedlichen Schädigungen zusammengefasst, wobei eine starke Streuung auftritt. Betrachtet man jeweils die maximalen Werte, so ist ein Restfestigkeitsabfall mit zunehmender Schädigung zu beobachten. So ist z.B. die Restfestigkeit einer Probe mit 20er Loch größer als die der Probe mit 30er Loch. Offenbar schädigt der Riss die Struktur weniger stark als die Eindellung, und eine Probe mit Eindellung hat eine größere Restfestigkeit als die Probe mit gleich großem Loch.

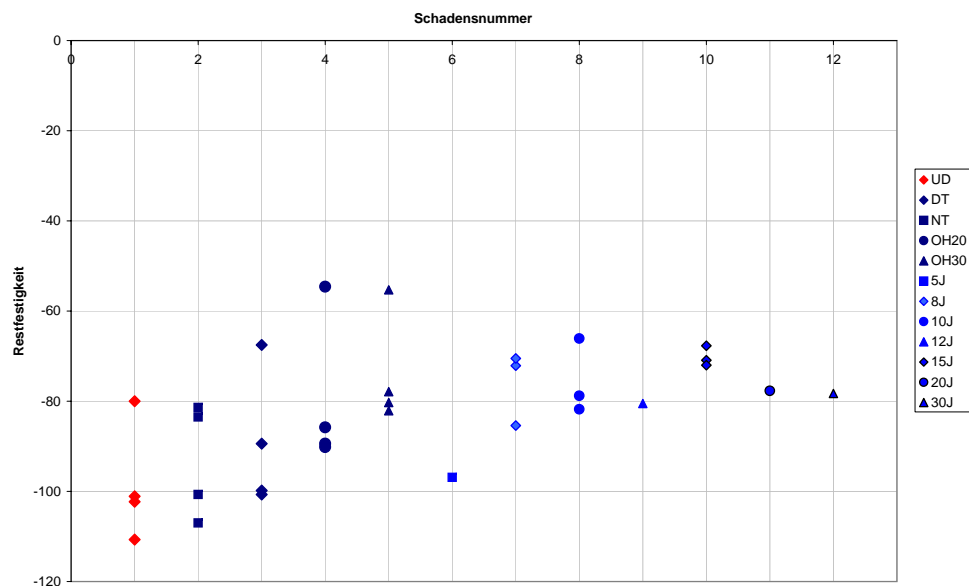


Abbildung 3.4: Restfestigkeiten für unterschiedlich vorgeschädigte Proben

Im Folgenden sollen nur noch die Versuchsergebnisse der Proben mit den jeweils höheren Restfestigkeiten (3.Tabellenspalte, Tabelle 3.2) für die Auswertung herangezogen werden. Bei den restlichen Proben tritt vermutlich aufgrund schlechter Qualität ein untypisches Versagensverhalten auf. Bei diesen Proben sind keine äußeren Schädigungen zu sehen, was

Probe	RF= Fmin	hohe RF in der jeweil. Gruppe	äußere Risse bzw andere Schädigungen nach CAI	w bei Fmin (pos=nach außen)
UD_01	-102.3		---	nicht vorh.
UD_02	-110.7	x	am linken und rechten Rand	-0.000859375
UD_03	-80		oben am linken Rand	0.025097657
UD_04	-101.1		am linken und rechten Rand	0.077968752
DT_01	-100.7	x	oben am linken und rechten Rand	0.296367195
DT_02	-99.8	x	---; Delaminationen hintere Deckschicht	n. vorh., ARAMIS
DT_03	-67.5		---	0.343138029
DT_03-4-11-2-11	-89.4		---	0.838496114
NT_01	-100.7		oben am rechten Rand	0.009205729
NT_02	-107	x	oben am linken und rechten Rand	0.00077474
NT_03	-83.5		---	0.039485678
NT_04	-81.4		oben am linken und rechten Rand	-0.10839844
OH20_01	-54.6		keine Risse	-0.000117188
OH20_02	-90.2	x	Risse vom Loch nach links und rechts	n. vorh., ARAMIS
OH20_03	-85.8		Risse vom Loch nach links und rechts, aber nicht bis zum Rand	0.374420582
OH20_04	-89.4	x	Risse vom Loch nach links und rechts	0.000755208
OH30_01	-55.3		---; obere DS vollständig abgelöst	-0.001054688
OH30_02	-80.3		Riss vom Loch zum rechten Rand	0.313144539
OH30_03	-82.1	x	Risse vom Loch nach links und rechts	0.1552474
OH30_04	-77.9		---; Risse und Delaminationen linker Rand hintere DS	0.137779951
5J	-96.9	x	---; aber Delam. hintere Deckschicht	n. vorh., ARAMIS
8J_01	-72.1		---	0.341399748
8J_03	-85.4	x	---	-0.350065113
8J_04	-70.5		---	0.319394539
10J_01	-81.8	x	---	0.111471357
10J_03	-78.8		oben am rechten Rand	-0.282382819
10J_04	-66.1		---	n. vorh., ARAMIS
12J	-80.5	x	---	0.000488281
15J_01	-70.9		---	-0.172246098
15J_02	-72	(x)	---	0.003483073
15J_04	-67.7		---	-0.074042971
20J	-77.7	x	am linken Rand	-0.190364588
30J	-78.3	x	---; kleiner Riss am Impactloch	0.376783863

Tabelle 3.2: Restfestigkeiten, sichtbare Schädigungen und transversale Verformungen

die Annahme unterstützt, dass diese Proben durch das Ablösen der Deckschichten vom Kern versagt sind.

Durch Sichtkontrolle der Proben nach CAI konnten sowohl Risse in den dünnen Deckschichten als auch Delaminationen in den dicken Deckschichten beobachtet werden (vergleiche Tabelle 3.2). In der letzten Tabellenspalte (Tabelle 3.2) sind die gemessenen transversalen Verschiebungen w zum Zeitpunkt der betragsmäßig maximalen Druckkräfte (entsprechen den jeweiligen Restfestigkeiten) aufgelistet. Es kann kein Zusammenhang zwischen den transversalen Verschiebungen und der Ausbildung der Risse und Delaminationen gefunden werden. Jedoch haben einige der Proben mit den höheren Restfestigkeiten sehr kleine transversale Verschiebungen. Dies führt zu der Vermutung, dass für diese Proben ein plötzliches Stabilitätsversagen ohne große Biegeverformung eingetreten ist. Diese Vermutung konnte nicht durch eine ARAMIS-Messung bestätigt werden, da bei den Proben mit den ARAMIS-Messungen immer kleine Biegeverformungen auftraten.

3.2.2 Steifigkeiten

Künstlich vorgeschädigte Proben

In Abbildung 3.5 sind die Kraft-Verzerrungs-Kurven an den Dehnmessstreifen (DMS) für eine ungeschädigte Probe und je eine der Proben mit den künstlichen Schädigungen aufgetragen. In all den hier gezeigten Fällen ist zu Beginn des Versuchs keinerlei Biegung

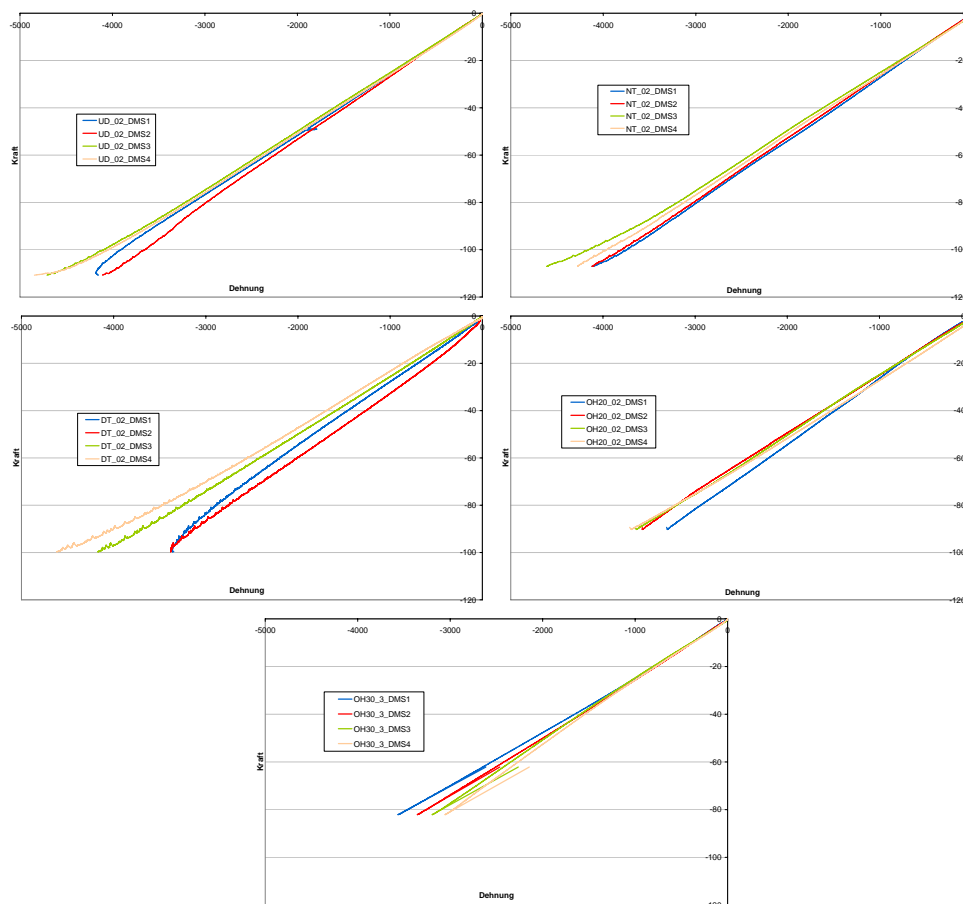


Abbildung 3.5: Dehnungen über Kraft für künstlich vorgeschädigte Proben

vorhanden, das heißt, dass die Lasteinleitung sehr gut ist. Gegen Ende des Versuches sind jeweils kleinere Abweichungen von der linearen Kurve, besonders bei Probe DT_02, zu sehen. Kurz vor dem Versagen biegt sich die Probe DT_02 der Art, so dass an den DMS die dicke Deckschicht einem größeren Druck ausgesetzt ist als die dünne Deckschicht. Diese Biegeverformung konnte tatsächlich mit den ARAMIS-Messungen aufgezeichnet werden (siehe Abbildung 3.16).

Nun sollen die Steifigkeitsabminderungen infolge der Schädigungen untersucht werden. Dazu werden die Steifigkeiten der geschädigten Probe mit denen der ungeschädigten Probe in den Kraft-Verzerrungs-Kurven verglichen. In Abbildung 3.6 sind deutlich flachere Kurven für die Probe OH30_03 zu erkennen, während für die Probe OH20_02 die Steifigkeitsreduktion weniger gut zu sehen ist, was vor allem dadurch bedingt ist, dass sich die Probe infolge ungleichmäßiger Lasteinleitung nicht gleichmäßig über die Breite verformt.

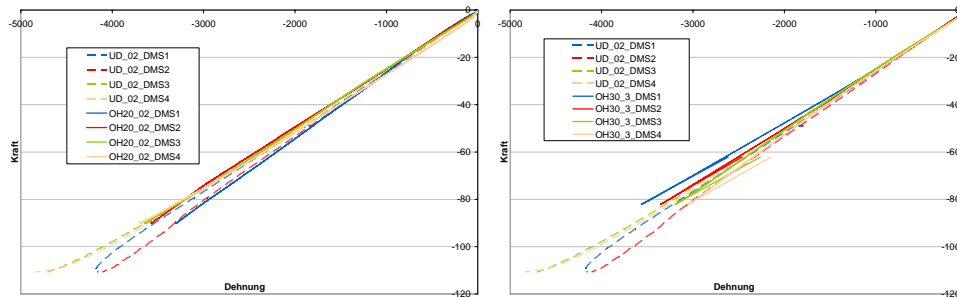


Abbildung 3.6: Dehnungen über Kraft für künstlich vorgeschädigte Proben im Vergleich zur ungeschädigten Probe

Impactierte Proben

Aus den Verzerrungs-Kraft-Kurven für die impactierten Proben in Abbildung 3.7 kann man schließen, dass die Lasteinleitungen für die verschiedenen Proben unterschiedlich gut waren. Während bei einigen Proben die Verzerrungs-Kraft-Kurven der verschiedenen Dehnmessstreifen so gut wie auf einander liegen, sind bei anderen Proben schon zu Beginn des Versuches Abweichungen zwischen den Kurven festzustellen. Abbildung 3.8 zeigt, dass bei den Proben 8J_03, 10J_01 und 30J_01 schon relativ früh transversale Verschiebungen in Plattenmitte auftreten, während bei den Proben 5J_01, 12J_01 und 15J_02 so gut wie keine derartigen Verschiebungen zu sehen sind. Jedoch kann aus den transversalen Verschiebungen kein eindeutiger Rückschluss auf die Restfestigkeiten gezogen werden, denn sonst müssten die Proben 5J_01, 12J_01 und 15J_02 sehr hohe Restfestigkeiten aufweisen, da sie keiner Biegung ausgesetzt sind, was jedoch nach Abbildung 3.4 nicht der Fall ist. Folglich spielen andere Einflüsse, wie zum Beispiel die Qualität der Kernanbindung, eine weit größere Rolle.

Nun sollen die Steifigkeiten der impactierten Proben mit der der ungeschädigten Probe verglichen werden: Bei beiden Proben 5J_1 und 8J_3 ist in Abbildung 3.9 ein Steifigkeitsverlust zu beobachten.

3.2.3 ARAMIS-Ergebnisse

Das ARAMIS-System ist ein optisches Verfahren für die Messung der 3D-Verschiebungen. Ist der zu messende Bereich klein genug, d.h. sind die Verschiebungsmessungen genau genug, können aus den 3D-Verschiebungen sogar brauchbare in-plane Verzerrungen mit der ARAMIS-Software berechnet werden. Durch das Messen der 3D-Verschiebungsfeldes erhofft man sich außerdem, die Güte der Lasteinleitung beurteilen zu können.

Das ARAMIS-System des DLR ist mobil einsetzbar, so dass die Messungen am ILR Dresden durchgeführt werden konnten. In dieser Testreihe wurden vier Proben, die Proben DT_02, OH20_02, 5J_01 und 10J_04, mit ARAMIS untersucht.

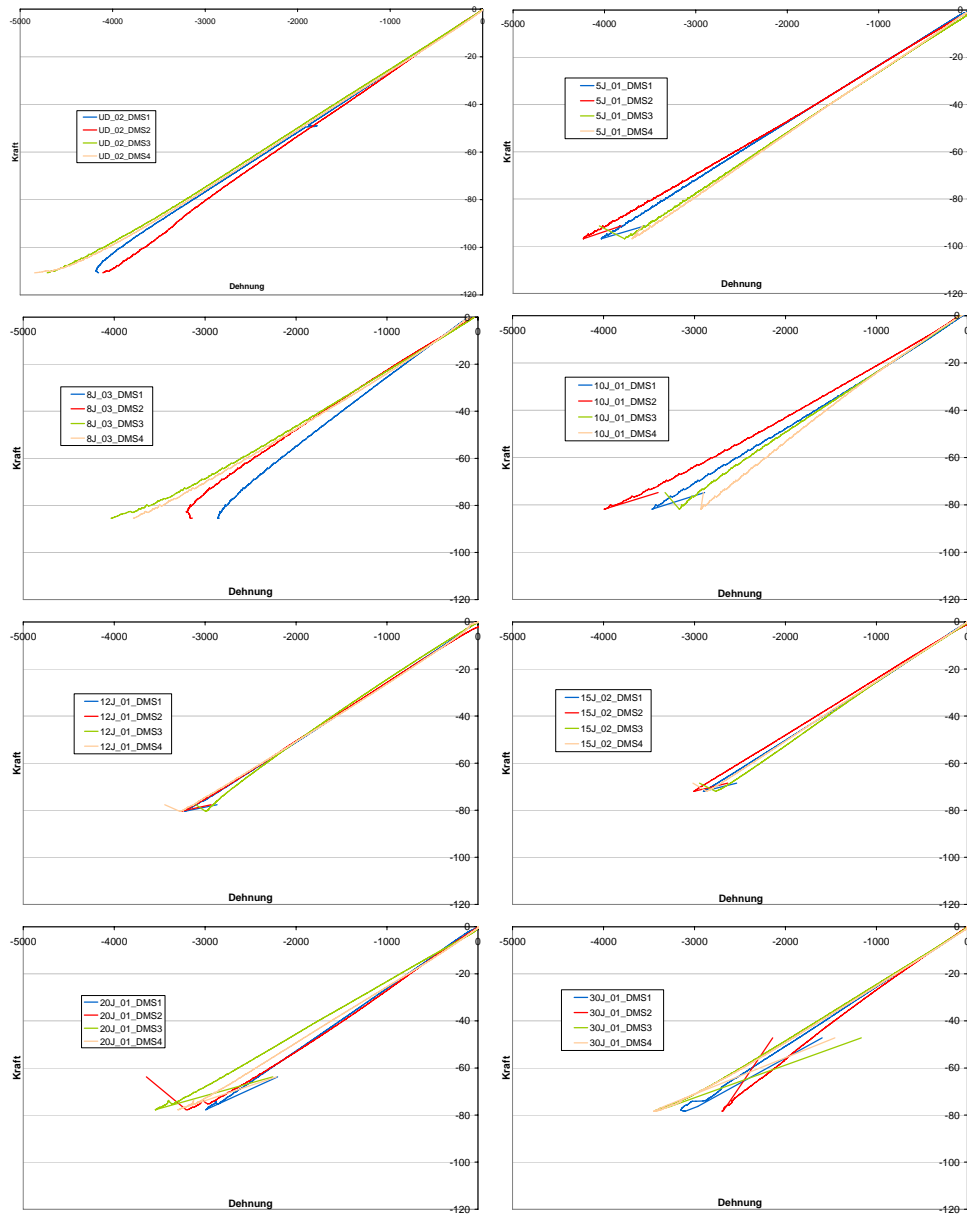


Abbildung 3.7: Dehnungen über Kraft für impactierte Proben

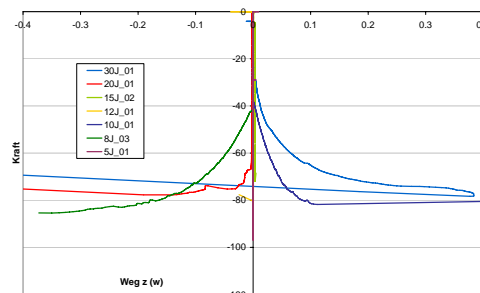


Abbildung 3.8: Transversale Verschiebung in Plattenmitte

Probe 5J_01

Für Probe 5J_1 sind die Ergebnisse leider nicht zu gebrauchen, da die Messungen durch starkes Luftflimmern gestört wurden.

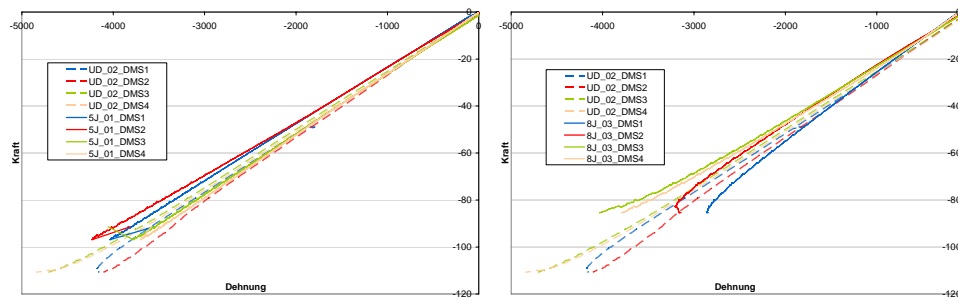


Abbildung 3.9: Dehnungen über Kraft für impactierte Proben im Vergleich zur ungeschädigten Probe

Probe 10J_04

Probe 10J_4 weist kein typisches Versagensverhalten ähnlich der anderen 10J-Proben auf. In Abbildung 3.10 ist ein kleiner Lastabfall vor dem eigentlichen, größeren Lastabfall zu

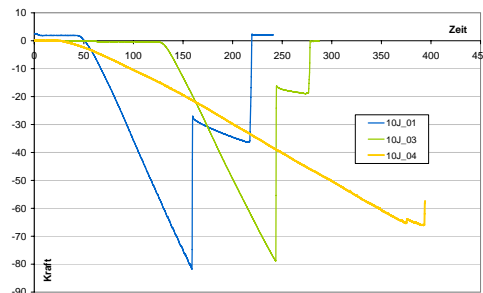


Abbildung 3.10: Kraft über der Zeit für Proben mit 10J-Impact

sehen. (Der kleinere Anstieg resultiert lediglich aus einer kleineren Belastungsgeschwindigkeit.) Es wird vermutet, dass der erste kleine Lastabfall durch eine Schwachstelle im Kernmaterial oder der Deckschicht-Kern-Anbindung entstanden ist. Die transversale Verschiebung in z-Richtung wächst stetig um den Impactschaden herum bis zu diesem ersten kleinen Lastabfall, das heißt, dass die Eindellung durch den Impactschaden sowohl in der Ebene als auch in der Tiefe wächst (Abbildung 3.11 (a)). Unmittelbar nach dem ersten kleinen Lastabfall wachsen die transversalen Verschiebungen sprunghaft an (Abbildung 3.11(b)), was schließlich zum Versagen der gesamten Probe (Abbildung 3.11(d)) führt.

Die Kraft-Verzerrungs-Kurven der DMS und die ARAMIS-Bilder der in-plane Verformungen in Lasttrichtung (Abbildung 3.12) zeigen, dass die Lasteinleitung für diese Probe sehr gut war.

Probe OH20_02

Die Probe OH20_02 hat in ihrer Gruppe die höchste Restfestigkeit erreicht. Damit ist das Verhalten dieser Probe bis zum Versagen von hohem Interesse. Leider trat auch bei dieser Probe Luftflimmern auf, so dass Ungenauigkeiten in den Messungen für die transversalen Verschiebungen auftreten. Es ist trotzdem eine Tendenz in Abbildung 3.13 erkennbar: Es

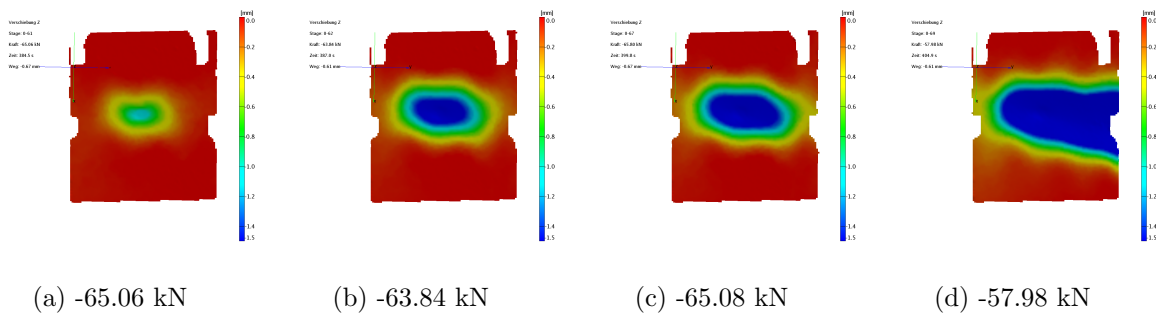


Abbildung 3.11: Wachsen der transversalen Verschiebungen für Probe 10J_04

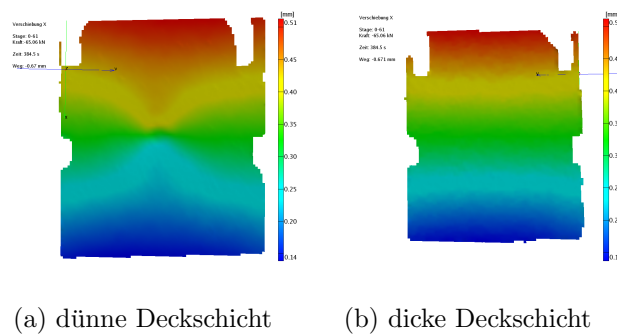


Abbildung 3.12: In-plane Verformungen in Lasttrichtung unmittelbar vor erstem kleinen Lastabfall für Probe 10J_04

bildet sich lokal um das Loch eine Eindellung der dünnen Deckschicht gegen den Kern aus, welche sich kurz vor dem Versagen bis zu den seitlichen Rändern ausbreitet. In Abbildung 3.13 sind die Zick-Zack-Linien der Faltwabenstruktur sehr deutlich zu erkennen. Auf der Rückseite ist ebenfalls, wie in Abbildung 3.14 dargestellt, eine wachsende Beule zu sehen. Die hintere Deckschicht beult jedoch im Gegensatz zur Vorderseite nach außen (weg vom Kern) über die gesamte Probenbreite. Die transversalen Verschiebungen in Plattenmitte wachsen laut den ARAMIS-Messungen von 0 mm auf -0.45 mm. Die Probe OH20_02 unterliegt einer Biegeverformung. Es handelt sich hier nicht um ein reines Stabilitätsversagen.

Die in-plane Verformungen in Lasttrichtung (Abbildung 3.15) zeigen, dass die Lasteinleitung für die Probe Probe OH20_02 nicht ganz optimal war. Die Lasteinleitung der dünnen und der dicken Deckschicht war jeweils am oberen Rand rechts stärker als auf der linken Seite. Das heißt, dass DMS4 stärker als DMS3 und DMS1 weniger als DMS2 gestaucht werden müsste, was tatsächlich der Fall ist (siehe Abbildung 3.5) Die Ergebnisse der ARAMIS-Messungen und die mit den DMS aufgenommenen Kraft-Verzerrungs-Kurven führen damit zu denselben Schlussfolgerungen.

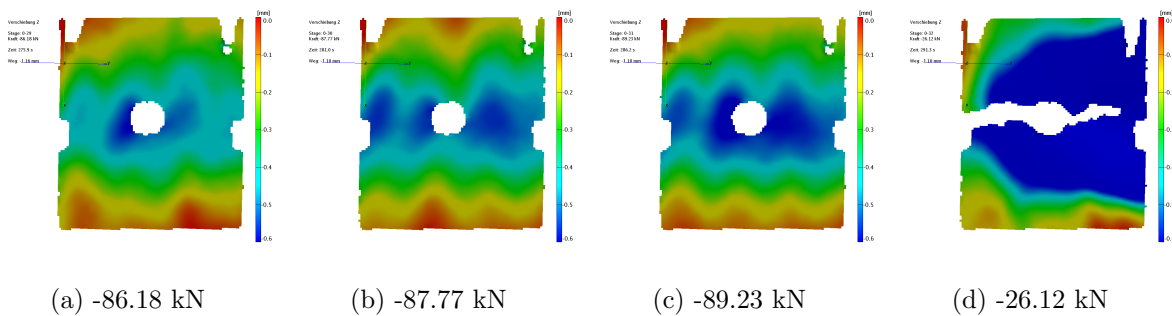


Abbildung 3.13: Wachsen der transversalen Verschiebungen der dünnen Deckschicht für Probe OH20_02

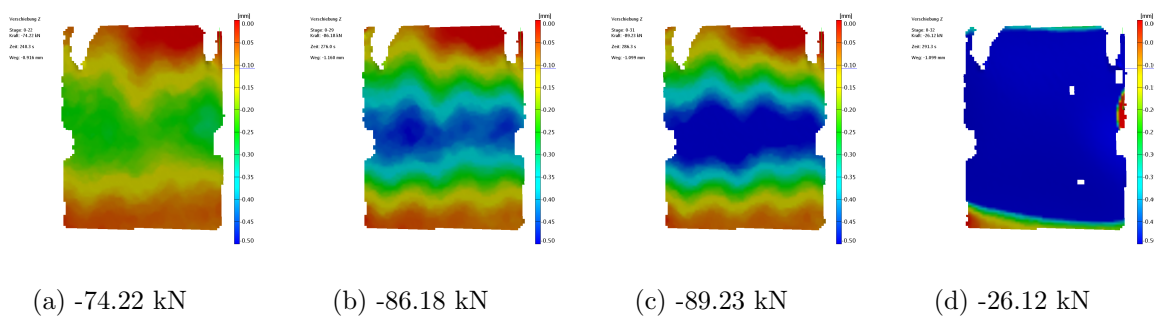


Abbildung 3.14: Wachsen der transversalen Verschiebungen der dicken Deckschicht für Probe OH20_02

Probe DT_02

Der erste Versuch der Probe DT_02 musste bei -90kN abgebrochen werden, da der Bildspeicher voll war. Bis dahin war eine ähnliche Biegeverformung, wie für Probe OH20_02 bereits beschrieben, zu beobachten. Der zweite Versuch wurde bei 0kN erneut gestartet, wobei das ARAMIS-System erst bei -58kN eingesetzt wurde. Es hat sich wieder die gleiche Biegeverformung wie beim ersten Versuch eingestellt. Die Bildfolgen für die transversalen Verformungen der beiden Deckschichten sind in Abbildung 3.16 zu sehen, wobei die gleichen Farben der oben dargestellten dünnen Deckschicht betragsmäßig leicht größere Verformungen als die der dickeren Deckschicht repräsentieren. Es sei darauf hingewiesen, dass die rot eingefärbten Stellen positive transversale Verschiebungen aufweisen, das heißt, dass an diesen Stellen sich die dünne Deckschicht vom Kern weg und die dicke Deckschicht zum Kern hin bewegt. An den Dehnmeßstreifen überlagert sich die Druckspannung aus der in-plane Belastung mit der Zugspannung aus der Biegebelastung für die dünne Deckschicht, während für die dicke Deckschicht die Druckspannung aus der in-plane Belastung noch durch die Druckspannung aus der Biegung vermehrt wird. Diese Überlegungen werden durch die Kraft-Verzerrungs-Kurve in Abbildung 3.5 bestätigt.

Die in-plane Verformungen in Lastrichtung zeigen, dass auch hier die Lastenleitung auf der Vorderseite (dünne Deckschicht) nicht optimal, während die Lastenleitung auf der Rückseite über die Breite sehr gleichmäßig war.

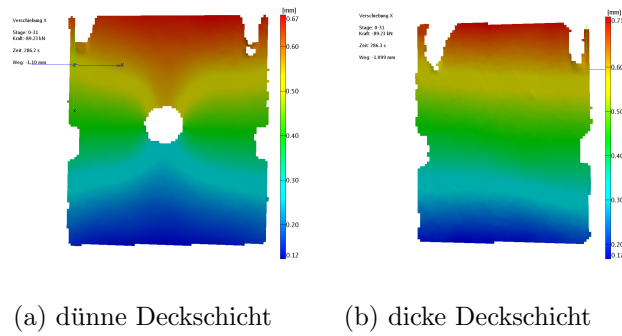


Abbildung 3.15: In-plane Verformungen in Lastrichtung unmittelbar vor erstem kleinen Lastabfall für Probe OH20_02

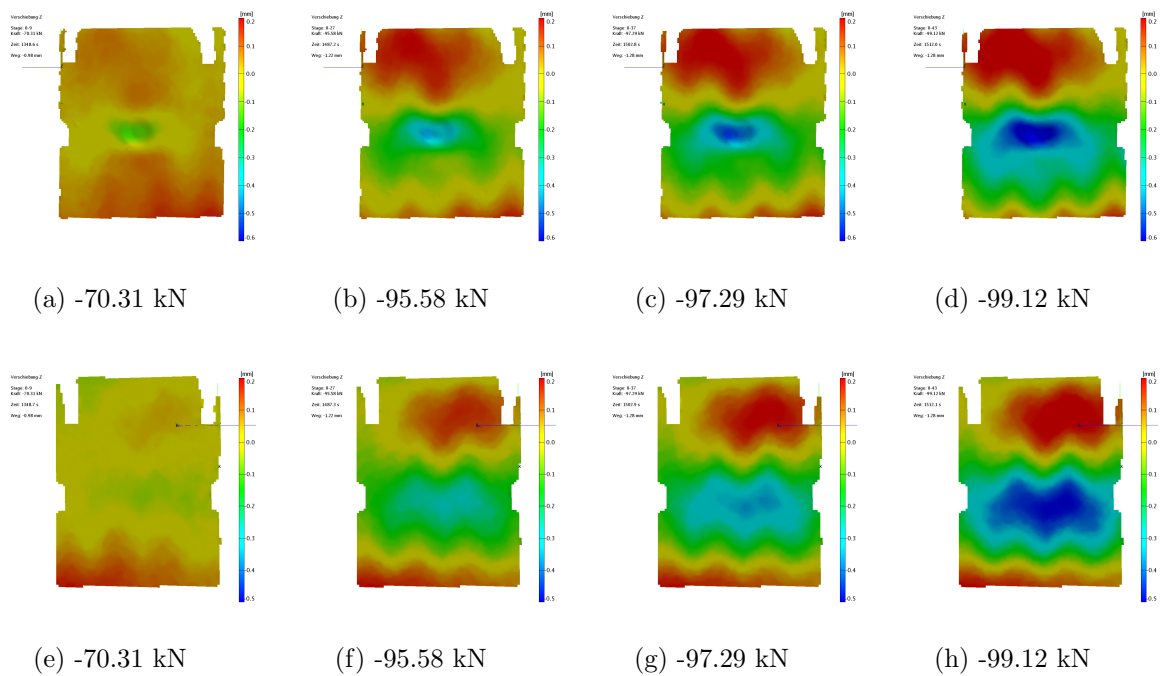


Abbildung 3.16: Wachsen der transversalen Verschiebungen der dünnen Deckschicht (obere Reihe) und der dicken Deckschicht (untere Reihe) für Probe DT_02

Kapitel 4

Zusammenfassung

Impactversuche

Bei den Impactversuchen wurde mit steigender Impactenergie eine Zunahme des Anstiegs der Kontaktkraft und eine Zunahme der Schadensgröße festgestellt. Bei Energien von 5J und 8J verläuft die Kontaktkraft-Zeit-Kurve ungefähr sinusförmig und es kommt zu Kernschäden und Delaminationen in der Deckschicht. Ab 10J fällt die Kontaktkraft bei etwa 2,5kN schlagartig ab, die Deckschicht reißt durch und ein deutlich sichtbarer Impactschaden entsteht. Die Länge der Risse sowie die Tiefe der Eindellung wird um so größer, je höher die Energie. Ab etwa 30J wird die obere Deckschicht komplett durchschlagen.

Die Versuchsergebnisse sind mit Einschränkungen für die Validierung einer Impactsimulation geeignet. Die Kontaktkraft-Zeit-Verläufe weisen kaum Streuungen auf und sind für einen Vergleich mit Simulationsergebnissen gut verwendbar. Aussagen über die Größe des Kernschadens fehlen. Die Streuungen der bleibenden Eindellungen sind zu groß, als dass sie für eine Validierung der Berechnung herhalten könnten. Das Versagensverhalten der Deckschicht ist nur in soweit bekannt, dass sich auch schon bei kleinen Energien kleine Bereiche von Delaminationen bilden und dass die Deckschicht ab einer bestimmten Kontaktkraft durchreißt. Für eine Beschreibung des Deckschichtverhaltens vor dem Komplettdurchriss sind noch Untersuchungen erforderlich. Da die Faser-Festigkeitswerte an den Deckschichtoberflächen auch bei 5J und 8J bereits überschritten sind, ist anzunehmen, dass hier bereits Deckschichtschäden in Form von einzelnen Faserbrüchen entstehen.

Restfestigkeitsversuche

In dem hier vorgestellten Versuchsprogramm versagten die Proben unter einaxialem Druck schlagartig mit einem lauten Knall. Das typische Ausbreiten der Impacteindellung quer zur Belastungsrichtung war in den meisten Fällen nicht mit bloßem Auge sichtbar. Es wurde jedoch anhand der ARAMIS-Messungen des 3D-Verschiebungsfeldes festgestellt, dass auch hier dieses typische Verformungsverhalten auftrat, jedoch mit wesentlich kleineren transversalen Verschiebungen als bei dem früheren LuFo3-Testprogramm des ILR

Dresden. Das liegt vor allem daran, dass die impactierte Deckschicht des Doppelschalers dicker als bei den früheren Proben war.

Bei den Druckversuchen traten starke Streuungen bezüglich der Restfestigkeit auf. Diese Streuungen sind mit der schwankenden Qualität der Sandwichproben zu erklären. Das Faltwellenmaterial wies erhebliche Höhendifferenzen auf, so dass eine flächige Verklebung mit den Deckschichten in manchen Fällen unmöglich war. Daher sind die Versuchsergebnisse nur bedingt für die Validierung von Simulationen zu gebrauchen. Dennoch konnte gezeigt werden, dass größere Schäden zu einer stärkeren Reduktion der Festigkeit führen. Darüber hinaus konnte das mobile ARAMIS-Messsystem erfolgreich eingesetzt werden. Mit dem zeitlich veränderten 3D-Verschiebungsbild auf den beiden Deckschichtoberflächen der Probe kann nicht nur das Verformungsverhalten bis zum Versagen der Probe sichtbar gemacht werden, sondern es können auch Aussagen über die Lasteinleitung getroffen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Kintscher, L. Kärger: *Versagen von Falt- und Honigwabenkernen unter kombinierter Druck-Schub-Belastung*. IB 131-2006/07; DLR Braunschweig.
- [2] R. van Huffelen, A. Zipfel, J. Baaran: *The determination of the effective mass and moment of inertia of a pendulum impactor*. IB 131-2004/01; DLR Braunschweig.

Anhang A

Materialbeschreibung für die Deckschichten

Beide Deckschichten sind aus CFK. Die dünnere Deckschicht, die gleichzeitig die geschädigte Deckschicht ist, ist ein Laminat aus Gewebe und Tape und die dickere ein Laminat aus unidirektionalen Einzelschichten. Der jeweilige Lagenaufbau und die zugehörigen Dicken

obere, dünne Deckschicht (2 Stück):

Lage	Orientierung	Material	Dicke
1	0/90	CFK-Gewebe	0,211mm
2	45	CFK-Tape	0,125mm
3	0	CFK-Tape	0,125mm
4	-45	CFK-Tape	0,125mm
5	-45	CFK-Tape	0,125mm
6	0	CFK-Tape	0,125mm
7	45	CFK-Tape	0,125mm
8	0/90	CFK-Gewebe	0,211mm

			1,172mm

untere, dicke Deckschicht (2 Stück):

Lage	Orientierung	Material	Dicke
1	0	CFK-Tape	0,125mm
2	0	CFK-Tape	0,125mm
3	-45	CFK-Tape	0,125mm
4	90	CFK-Tape	0,125mm
5	45	CFK-Tape	0,125mm
6	0	CFK-Tape	0,125mm
7	0	CFK-Tape	0,125mm
8	45	CFK-Tape	0,125mm
9	90	CFK-Tape	0,125mm
10	-45	CFK-Tape	0,125mm
11	0	CFK-Tape	0,125mm
12	0	CFK-Tape	0,125mm

			1,500mm

Tabelle A.1: Lagenaufbau der Deckschichten

sind Tabelle A.1 zu entnehmen.

Das CFK-Material (siehe Tabelle A.2) ist von der Firma Cytec geliefert worden. Die Qua-

CFK-Tape:	Hersteller: Cytec Halbzeug: 977-2-35-12K-HTS-134-300 Rollenbreite: 300mm
CFK-Gewebe:	Hersteller: Cytec Halbzeug: 977-2A-44-3K-HTA-PW-193 Rollenbreite: 1200mm

Tabelle A.2: CFK-Material

lität der Deckschichten ist mittels Ultraschallbilder für die einzelnen Proben elektronisch dokumentiert.

Anhang B

Schadensbilder der durch Impact belasteten Sandwichschalen

Für alle Impactversuche sind im Folgenden die Fotos der impactgeschädigten Deckschicht sowie je zwei Ultraschallbilder (Fehlerecho und Rückwandecho) zusammengestellt.

- Das Fehlerecho der Deckschicht gibt durch die größte Echo-Amplitude aller Schäden in Dickenrichtung Auskunft über die stärkste Delamination. Bei großen Eindellungen kann keine ausreichende Anbindung erreicht werden, so dass bei höheren Energien nur der äußere Schadensring detektiert wird.
- Beim Rückwandecho wird durch die Amplitude des an der Deckschichtrückseite reflektierten Ultraschalls die Summe der Schäden aufgezeichnet, wobei auch die Information über die Anbindung der Deckschicht an den Kern enthalten ist.
- Im Versuchsprogramm wurden außerdem die Laufzeiten der Fehlerechos aufgenommen, aus denen die Fehlertiefen hervorgehen. Diese sind hier nicht aufgeführt; sie liegen in den Dateien xxJ-Proben-Nr._FT.bmt vor.

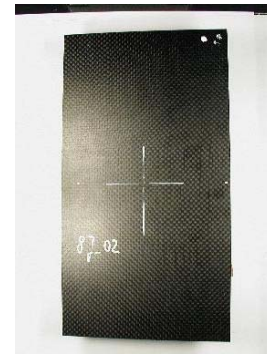
5J-01_1-1



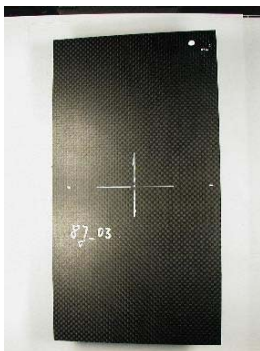
8J-01_1-3



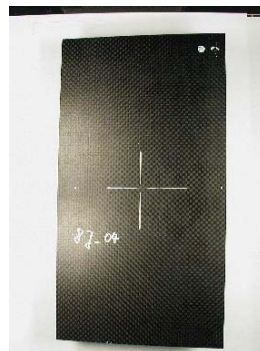
8J-02_1-2



8J-03_1-17



8J-04_1-8

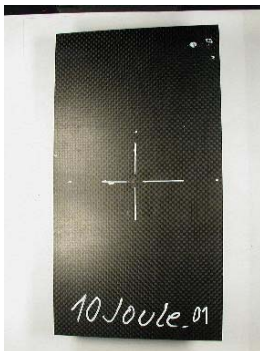


8J-05_1-15

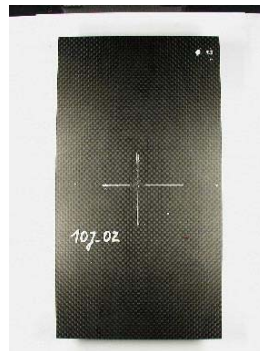


Abbildung B.1: Fotos der impactbelasteten Deckschichten bei 5J- und 8J-Impacts.

10J-01_1-9



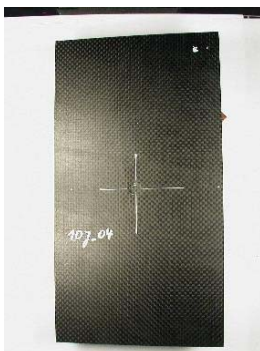
10J-02_1-19



10J-03_1-18



10J-04_1-11



10J-05_1-16



12J-01_2-14

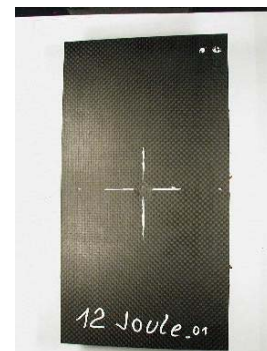


Abbildung B.2: Fotos der impactbelasteten Deckschichten bei 10J- und 12J-Impacts.

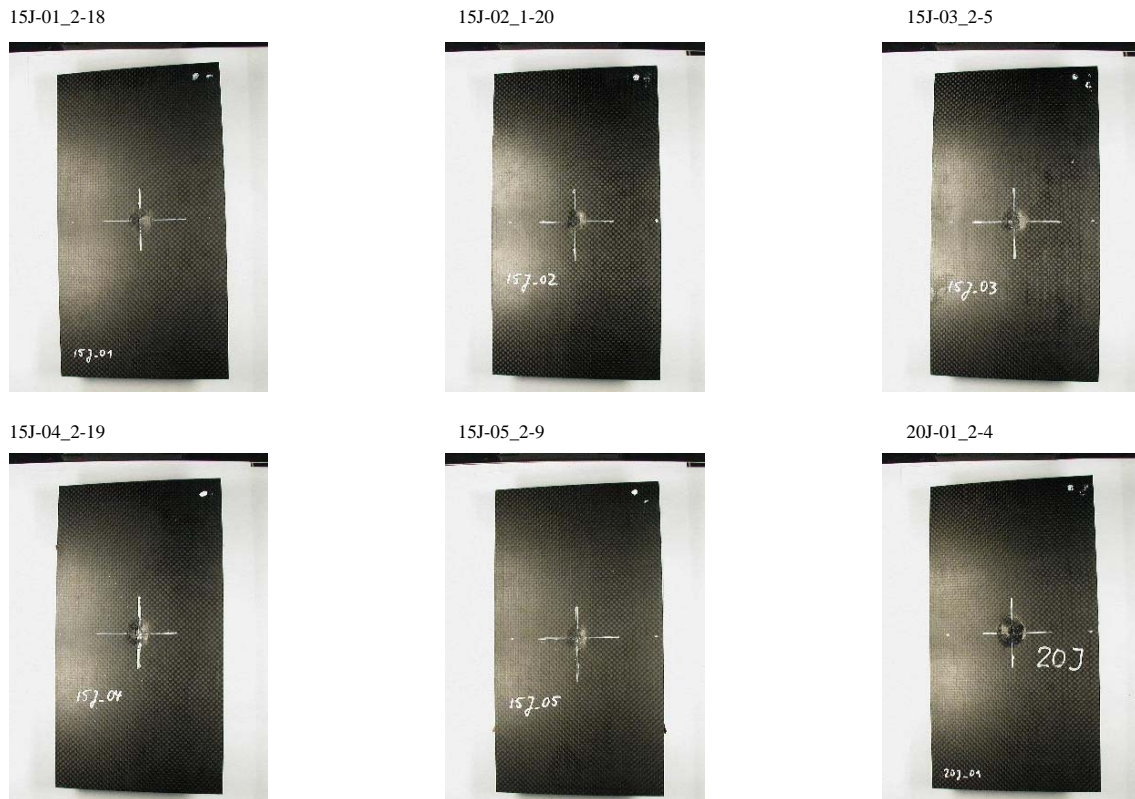
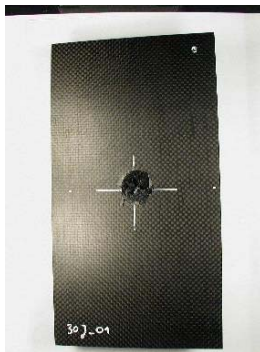
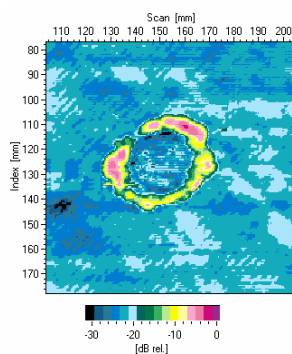


Abbildung B.3: Fotos der impactbelasteten Deckschichten bei 15J- und 20J-Impacts.

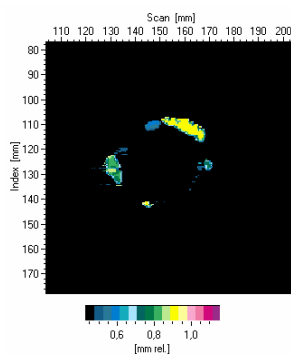
Foto: 30J-01_2-3



Fehlerecho: 30J-01_2-3_FE



Fehlertiefe: 30J-01_2-3_FT



Rückwandecho: 30J-01_2-3_RE

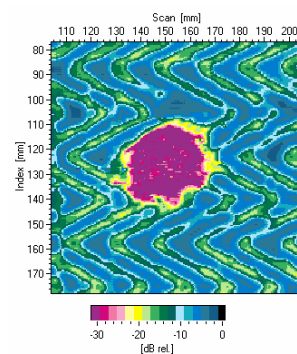


Abbildung B.4: 30J-Impact: Foto und Ultraschallbilder der impactbelasteten Deckschicht.

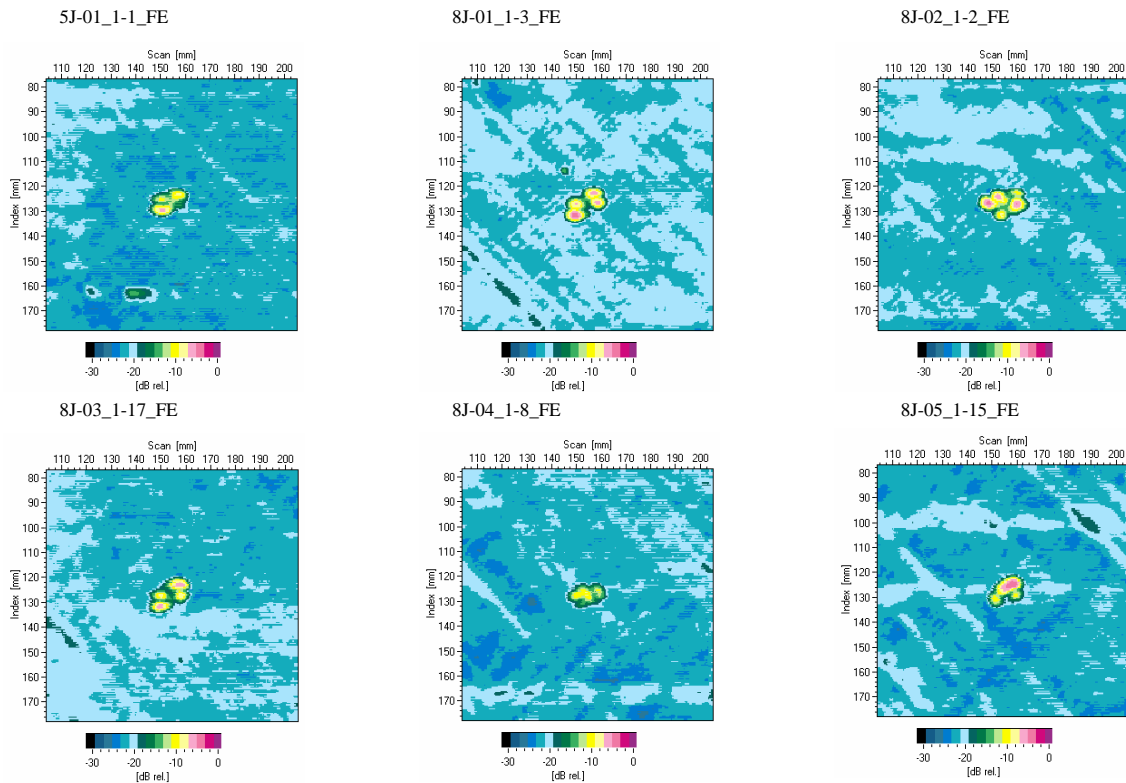


Abbildung B.5: Fehlerechos der impactbelasteten Deckschichten bei 5J- und 8J-Impacts.

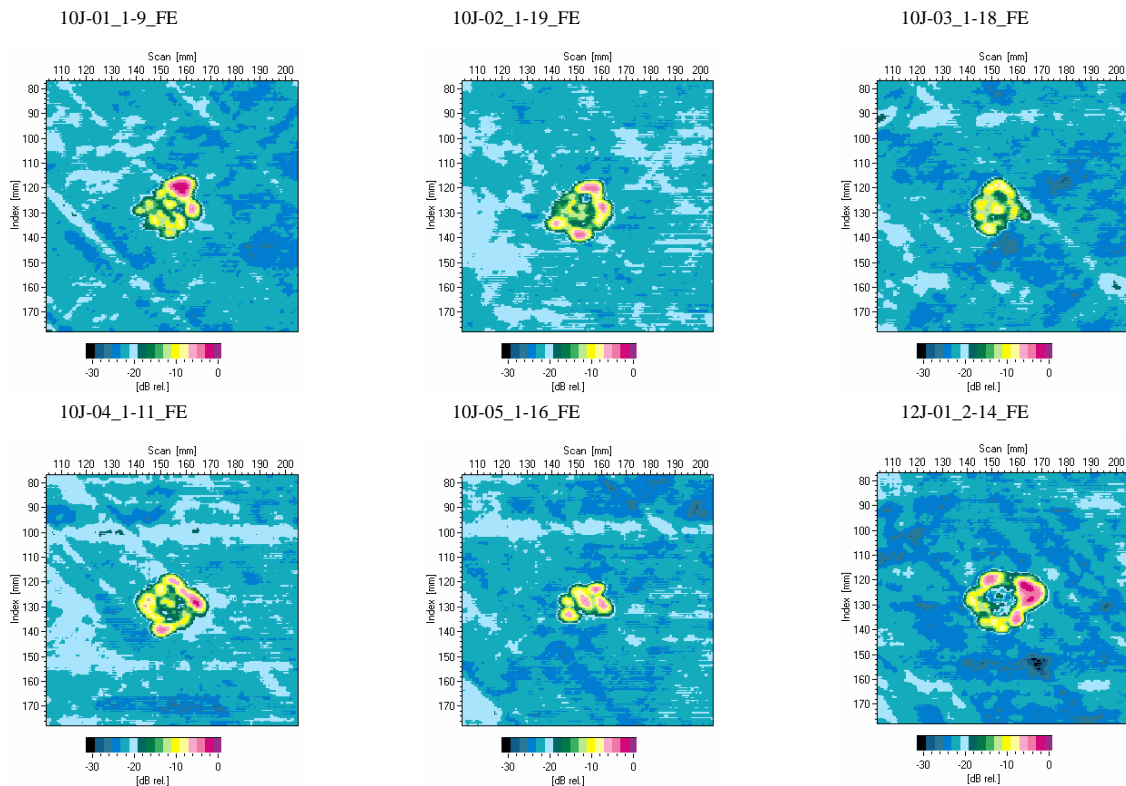


Abbildung B.6: Fehlerechos der impactbelasteten Deckschichten bei 10J- und 12J-Impacts.

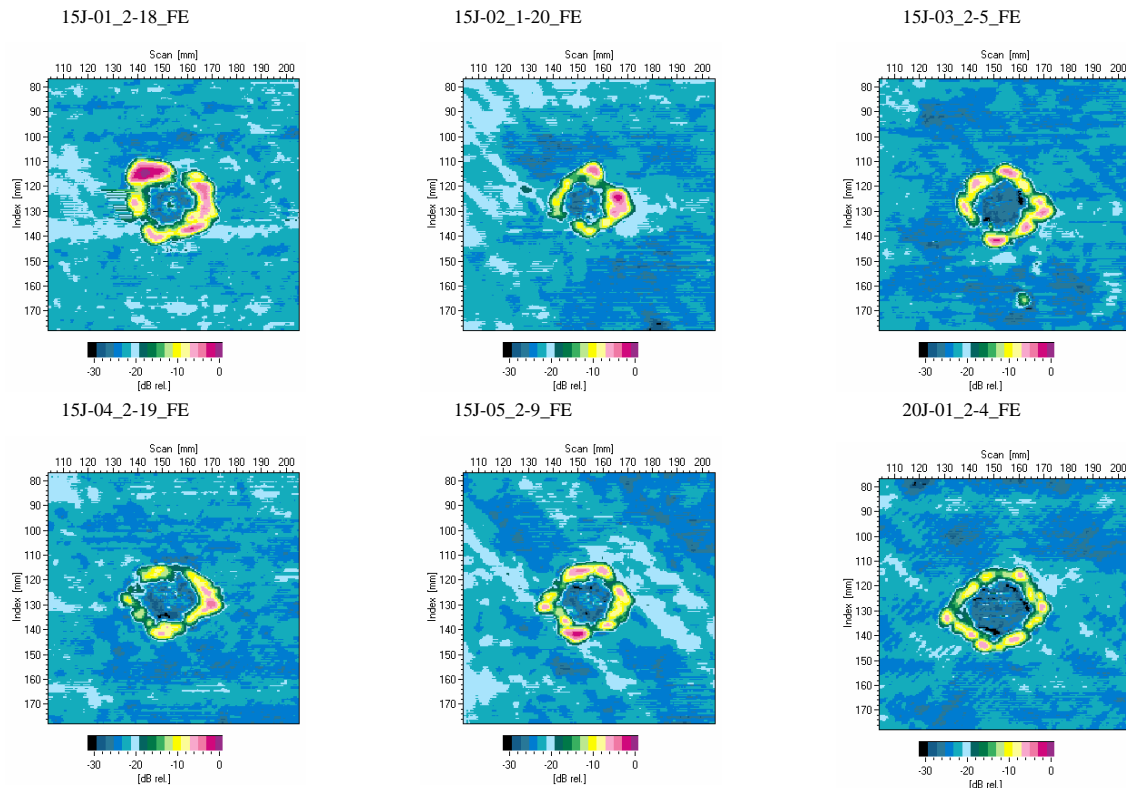


Abbildung B.7: Fehlerechos der impactbelasteten Deckschichten bei 15J- und 20J-Impacts.

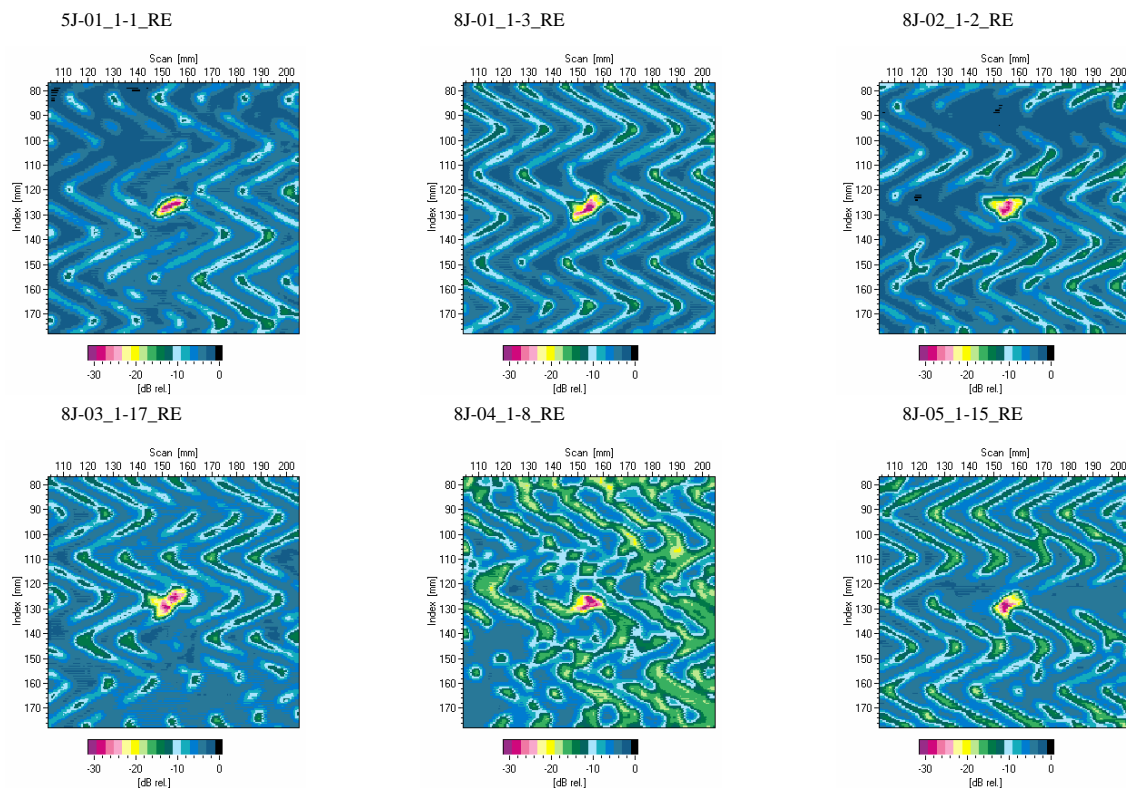


Abbildung B.8: Rückwandechos der impactbelasteten Deckschichten bei 5J- und 8J-Impacts.

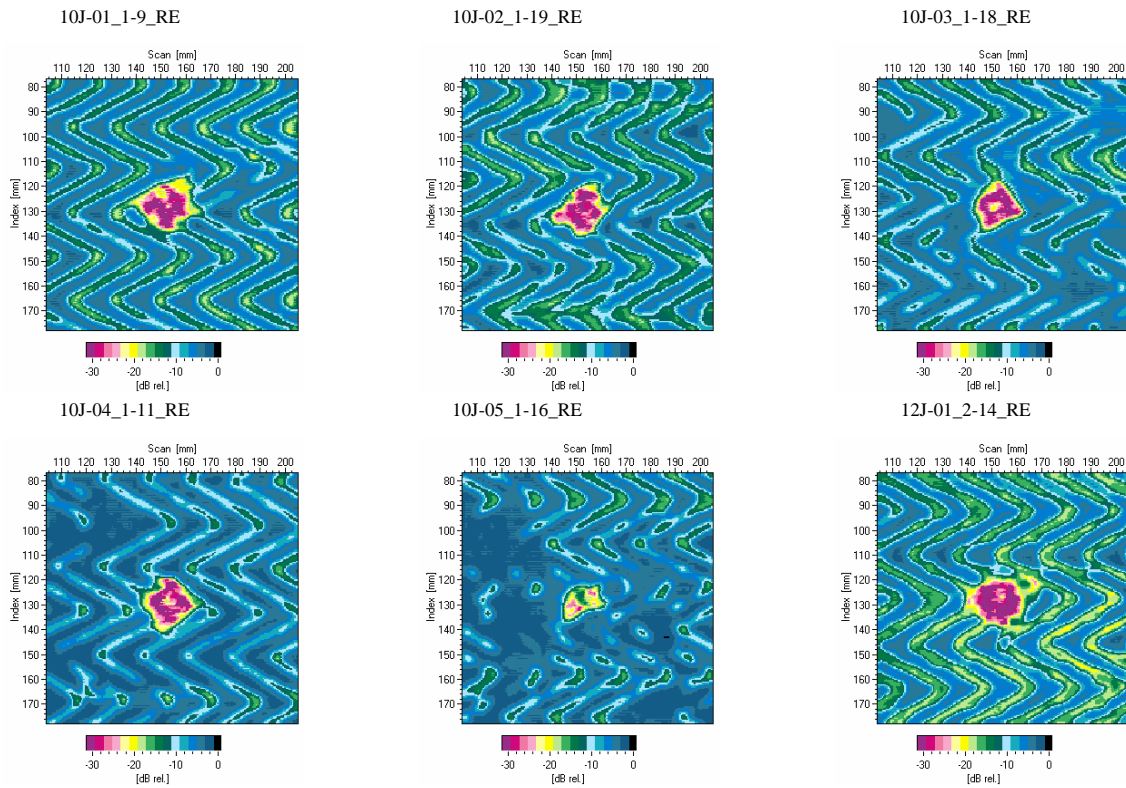


Abbildung B.9: Rückwandechos der impactbelasteten Deckschichten bei 10J- und 12J-Impacts.

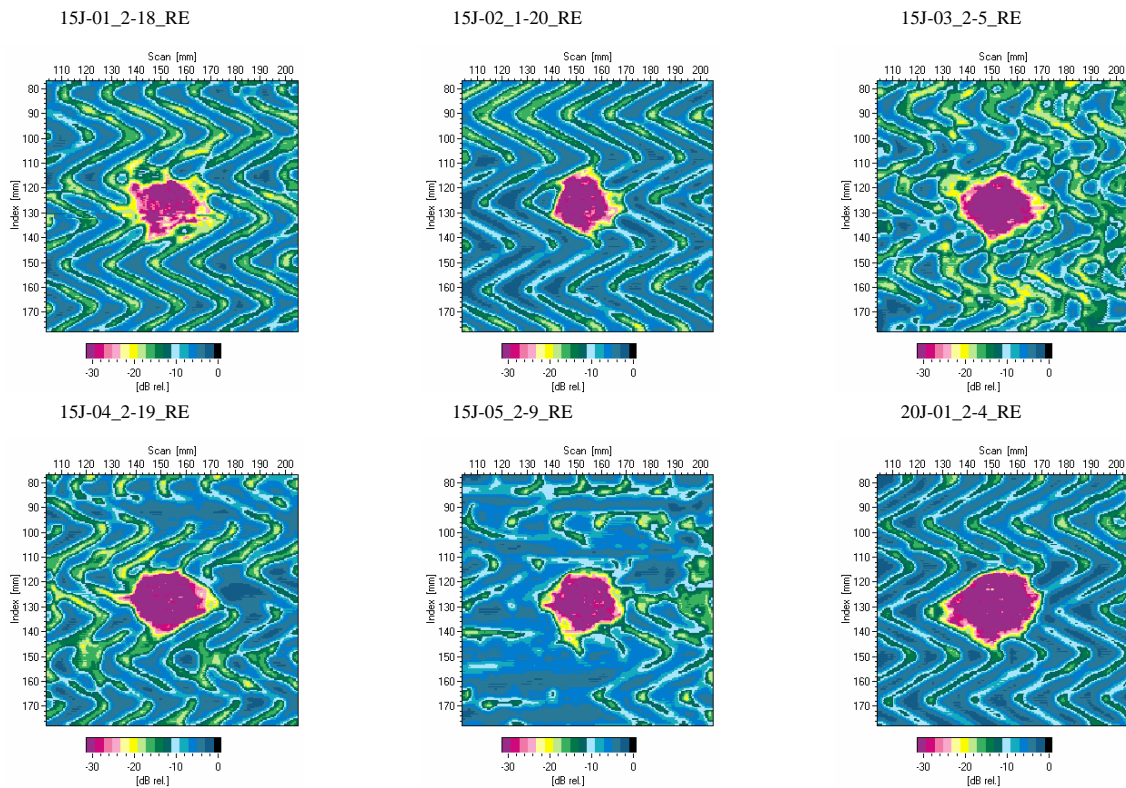


Abbildung B.10: Rückwandechos der impactbelasteten Deckschichten bei 15J- und 20J-Impacts.